



Lu, Xiaonan; Sun, Kai; Huang, Lipei; Xiao, Xi; Guerrero, Josep M.

Published in:
Dianli Xitong Zidonghua

DOI (link to publication from Publisher):
[10.7500/AEPS201208277](https://doi.org/10.7500/AEPS201208277)

Publication date:
2013

Document Version
Early version, also known as pre-print

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):
Lu, X., Sun, K., Huang, L., Xiao, X., & Guerrero, J. M. (2013). . *Dianli Xitong Zidonghua*, 37(1).
<https://doi.org/10.7500/AEPS201208277>

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1026.2013.01.001

孤岛运行交流微电网中分布式储能系统改进下垂控制方法

陆晓楠¹, 孙 凯¹, 黄立培¹, 肖 曦¹, J. M. GUERRERO²
(1. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 清华大学, 北京市 100084;
2. 丹麦奥尔堡大学能源技术系, 奥尔堡 9220, 丹麦)

摘要:微电网系统中常采用分布式储能单元作为能量缓冲环节,以提升系统供电的稳定性和可靠性。为实现负荷功率在分布式储能单元之间的合理分配,提出了基于荷电状态(SOC)的改进下垂控制方法。该方法采用分布式控制方式,根据各储能单元的 SOC,实时调整下垂系数,使 SOC 较大的储能单元提供较多的有功功率,而 SOC 较小的储能单元提供较少的有功功率,并采用传统下垂控制方法对无功功率进行均等分配。建立了基于 SOC 的下垂控制方法小信号模型,以验证控制系统的稳定性。同时,搭建了基于 MATLAB/Simulink 的仿真模型和 2×2.2 kW 的实验样机,仿真和实验证明了所提方法的正确性和有效性。

关键词:交流微电网;孤岛运行;储能系统;分布式控制;下垂控制;荷电状态(SOC)

0 引言

可再生能源储量丰富,清洁无污染,近年来受到国内外学术界和工业界普遍关注^[1-2]。微电网的提出是为实现多种可再生能源的整合,以形成小型区域电网^[3-10]。微电网运行过程中,接口变换器控制是重要研究内容之一^[11]。可再生能源往往分布式接入系统,因此,各接口变换器常呈现并联关系。各并联变换器之间的功率均衡是微电网接口变换器控制的技术要点之一。根据系统的通信结构,并联变换器功率分配方法可按照有无通信线分为 2 类。通信线的使用能够降低系统冗余性,却增加了系统成本,难以适应微电网中可再生能源分布式接入的特点。为解决微电网中并联接口变换器功率分配的问题,文献[8-9]提出类似同步发电机系统下垂控制的功率分配方法。该方法无需通信或只需低频通信即可实现功率均分,可满足微电网分布式结构的需要。

在实际微电网系统中,由于可再生能源功率输出不稳定,因此,需增加储能单元,以提升系统供电的稳定性和可靠性^[12-14]。在储能单元的工作过程中,其自身的剩余容量或荷电状态(state-of-charge, SOC)反映了储能单元的电能输出能力。由于微电网中的储能单元通常分布式接入公共母线,因此,储

能单元输出功率的分配同样需要满足分布式结构的要求。文献[9]通过调整 SOC,改变下垂控制系数,进而改变负荷功率分配关系。但该方法仅限于概念层面,未展开细节研究。文献[10]在文献[9]的基础上进行了细化探索,对直流微电网中基于储能单元 SOC 的改进下垂控制方法进行了分析。本文针对交流微电网中有功-频率、无功-电压幅值相互解耦的下垂特性关系,对基于 SOC 的负荷功率分配方法在交流系统中的适用性进行了扩展分析,研究了该方法在交流系统中的稳定性问题。

本文基于交流微电网的分布式结构,将传统下垂控制方法应用到交流微电网分布式储能系统中。在储能单元种类相同,且功率等级相近的情况下,结合 SOC 概念,对传统下垂控制方法进行改进,以实现根据 SOC 调整有功功率输出的目的,并对无功功率进行均等分配。

1 基于储能单元 SOC 的改进下垂控制方法

1.1 控制系统模型分析

本文以包含 2 台并联逆变器的交流微电网系统为例,其系统结构如图 1 所示。当逆变器输出阻抗满足强感性要求时,传统的下垂控制可表示为:

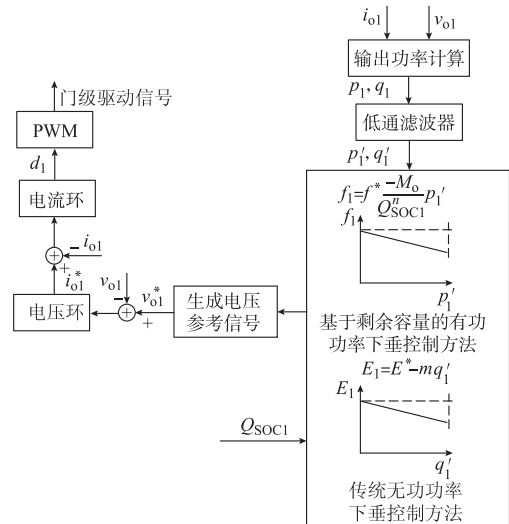
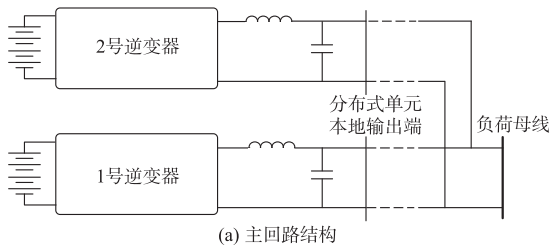
$$f = f^* - m_p p_{AC,LPF}$$
$$E = E^* - n_q q_{AC,LPF}$$

(1)
(2)

式中: f 和 E 分别为本地交流侧输出电压的频率和幅值; f^* 和 E^* 分别为频率和幅值的给定值; $p_{AC,LPF}$ 和 $q_{AC,LPF}$ 分别为低通滤波后的交流侧有功功率和无功功率取值; m_p 和 n_q 分别为对应有功功率和无功

收稿日期:2012-08-31;修回日期:2012-11-21。
国家自然科学基金资助项目(51177083);国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA050217);台达电力电子科教发展计划资助项目(DREG2010007)。

功率的下垂系数。



(b) 每台逆变器控制系统结构
 Q_{SOC1} 为1号逆变器储能单元剩余容量

图 1 交流微电网中考虑储能单元 SOC 的并联逆变器控制框图

Fig. 1 Control diagram of parallel inverters in AC microgrids considering SOC of each energy storage unit

当接口逆变器直流侧分别和分布式储能单元相连时,负荷有功功率需根据 SOC(式中记为 Q_{SOC}) 进行分配。因此,对式(1)进行修改,得到:

$$f_1 = f^* - \left(\frac{m_0}{Q_{SOC1}^n} \right) p_{AC,LPF1} \quad (3)$$

$$f_2 = f^* - \left(\frac{m_0}{Q_{SOC2}^n} \right) p_{AC,LPF2} \quad (4)$$

式中: m_0 为 Q_{SOC} 为 1 时的初始下垂系数; Q_{SOC1} 和 Q_{SOC2} 分别为 1 号、2 号逆变器储能单元的剩余容量; n 为修改下垂系数时引入的 SOC 的幂指数。

以下推导中,带有上标“ $\hat{\cdot}$ ”的变量表示对应量的小信号扰动分量,大写字母标注的变量表示对应量的稳态分量。对式(3)、式(4)进行小信号扰动,可得:

$$m_0 \hat{p}_{AC,LPF1} = n Q_{SOC1}^{n-1} (F^* - F_1) Q_{SOC1} - Q_{SOC1}^n \hat{f}_1 \quad (5)$$

$$m_0 \hat{p}_{AC,LPF2} = n Q_{SOC2}^{n-1} (F^* - F_2) Q_{SOC2} - Q_{SOC2}^n \hat{f}_2 \quad (6)$$

采用库仑计算法得到储能单元 SOC 为:

$$Q_{SOC1} = Q_{SOC1,t=0} - \frac{1}{C_e} \int i_{DC1} dt \quad (7)$$

$$Q_{SOC2} = Q_{SOC2,t=0} - \frac{1}{C_e} \int i_{DC2} dt \quad (8)$$

式中: $Q_{SOC1,t=0}$ 和 $Q_{SOC2,t=0}$ 分别为 SOC 的初始值; i_{DC1} 和 i_{DC2} 分别为储能单元输出电流; C_e 为储能单元容量。

需指出的是,本文算法基于各单体功率等级相同或相近的分布式储能系统,即各 C_e 近似相等。当 C_e 不同时,需使下垂系数与储能单元当前的容量 $C_e Q_{SOC}$ 成反比,分析方法和储能单元容量相同时类似。本文只针对储能单元容量相同或相近的情况。

当忽略逆变器损耗时,其直流侧输入功率和交流侧输出功率相等,则有:

$$p_{AC1} = p_{in1} = v_{DC1} i_{DC1} \quad (9)$$

$$p_{AC2} = p_{in2} = v_{DC2} i_{DC2} \quad (10)$$

式中: p_{AC1} 和 p_{AC2} 分别为逆变器交流侧输出功率; p_{in1} 和 p_{in2} 分别为逆变器直流侧输入功率; v_{DC1} 和 v_{DC2} 分别为直流电压。

由储能单元运行特点可知,在较大 SOC 变化范围内,储能单元输出电压维持恒定,即满足:

$$\begin{cases} v_{DC1} = V_{DC1} \\ v_{DC2} = V_{DC2} \end{cases} \quad (11)$$

式中: V_{DC1} 和 V_{DC2} 分别为储能单元输出电压的恒定值。

由式(7)~式(11),可得:

$$Q_{SOC1} = Q_{SOC1,t=0} - \frac{1}{C_e V_{DC1}} \int p_{AC1} dt \quad (12)$$

$$Q_{SOC2} = Q_{SOC2,t=0} - \frac{1}{C_e V_{DC2}} \int p_{AC2} dt \quad (13)$$

对式(12)和式(13)进行小信号扰动,并将其结果变换到频域,可得:

$$s \hat{Q}_{SOC1} = - \frac{\hat{p}_{AC1}}{C_e V_{DC1}} \quad (14)$$

$$s \hat{Q}_{SOC2} = - \frac{\hat{p}_{AC2}}{C_e V_{DC2}} \quad (15)$$

在使用下垂控制的过程中,需先对输出功率进行低通滤波,再将其代入下垂表达式。滤波前后的功率关系为:

$$L(p_{AC,LPF1}) = G_{LPF} L(p_{AC1}) \quad (16)$$

$$L(p_{AC,LPF2}) = G_{LPF} L(p_{AC2}) \quad (17)$$

式中: $L(\cdot)$ 表示拉普拉斯变换。此处,低通滤波器 G_{LPF} 选为二阶形式,其表达式为:

$$G_{LPF} = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (18)$$

式中: ω_0 为截止频率; ζ 为滤波器衰减系数。

对式(16)和式(17)进行小信号扰动,并将结果代入式(14)和式(15)中,可得:

$$s\hat{Q}_{\text{SOC1}} = -\frac{\hat{p}_{\text{AC,LPF1}}}{C_e V_{\text{DC1}} G_{\text{LPF}}} \quad (19)$$

$$s\hat{Q}_{\text{SOC2}} = -\frac{\hat{p}_{\text{AC,LPF2}}}{C_e V_{\text{DC2}} G_{\text{LPF}}} \quad (20)$$

由式(5)、式(6)、式(19)和式(20),可得:

$$m_0 \hat{p}_{\text{AC,LPF1}} = -nQ_{\text{SOC1}}^{n-1} (F^* - F_1) \cdot \frac{\hat{p}_{\text{AC,LPF1}}}{C_e V_{\text{DC1}} s G_{\text{LPF}}} - Q_{\text{SOC1}}^n \hat{f}_1 \quad (21)$$

$$m_0 \hat{p}_{\text{AC,LPF2}} = -nQ_{\text{SOC2}}^{n-1} (F^* - F_2) \cdot \frac{\hat{p}_{\text{AC,LPF2}}}{C_e V_{\text{DC2}} s G_{\text{LPF}}} - Q_{\text{SOC2}}^n \hat{f}_2 \quad (22)$$

为简化式(21)和式(22),设

$$k_{\text{in1}} = nQ_{\text{SOC1}}^{n-1} \frac{F^* - F_1}{C_e V_{\text{DC1}}} \quad (23)$$

$$k_{\text{in2}} = nQ_{\text{SOC2}}^{n-1} \frac{F^* - F_2}{C_e V_{\text{DC2}}} \quad (24)$$

可得:

$$\hat{p}_{\text{AC,LPF1}} = -\frac{Q_{\text{SOC1}}^n s G_{\text{LPF}}}{m_0 s G_{\text{LPF}} + k_{\text{in1}}} \hat{f}_1 \quad (25)$$

$$\hat{p}_{\text{AC,LPF2}} = -\frac{Q_{\text{SOC2}}^n s G_{\text{LPF}}}{m_0 s G_{\text{LPF}} + k_{\text{in2}}} \hat{f}_2 \quad (26)$$

与此同时,在公共点处:

$$p_{\text{AC1}} + p_{\text{AC2}} = P_{\text{load}} \quad (27)$$

式中: P_{load} 为负荷功率。

微电网系统中,不同点的频率可视为相同,则有:

$$f_1 = f_2 \quad (28)$$

对式(27)和式(28)进行小信号扰动,并将结果变换到 s 域,联立所得频域结果及式(25)和式(26),可得系统的特征方程为:

$$As^2 + Bs + C = 0 \quad (29)$$

式中: A, B, C 为系数,且

$$\begin{aligned} A &= k_{\text{in1}} Q_{\text{SOC2}}^n + k_{\text{in2}} Q_{\text{SOC1}}^n \\ B &= 2\zeta\omega_0 (k_{\text{in1}} Q_{\text{SOC2}}^n + k_{\text{in2}} Q_{\text{SOC1}}^n) + \omega_0^2 m_0 (Q_{\text{SOC1}}^n + Q_{\text{SOC2}}^n) \\ C &= \omega_0^2 (k_{\text{in1}} Q_{\text{SOC2}}^n + k_{\text{in2}} Q_{\text{SOC1}}^n) \end{aligned}$$

根据式(29)所得特征方程可分析改进的下垂控制方法的稳定性。对于不同储能单元的 SOC 及其幂指数 n ,系统的主导极点分布如图 2 和图 3 所示。此处,初始下垂系数 m_0 的取值为 0.0006 Hz/kW ,负荷功率为 1800 W ,线路电感为 1.8 mH ,电池容量为 600 Ah ,储能单元输出电压为 600 V ,二阶低通滤波器的截止频率和衰减系数分别为 50 rad/s 和 0.707 。图 2 为 Q_{SOC1} 保持不变,而 Q_{SOC2} 以 10% 的步长从 90% 减小到 10% 的情况下,系统主导极点的分布情况。各极点依次以序号 $1, 2, \dots, 9$ 标明。

由于 Q_{SOC1} 和 Q_{SOC2} 的地位对等,此处只给出 Q_{SOC2} 减小情况下的主导极点分布。图 3 为幂指数 n 从 2 变到 9 的情况下,系统主导极点的分布情况。各极点依次以序号 $1, 2, \dots, 8$ 标明。由图 2 和图 3 可知,系统的主导极点均位于左半平面,保证了改进的下垂控制方法的稳定性。

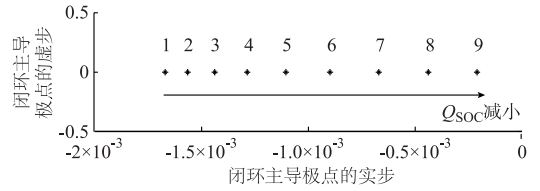


图 2 SOC 从 90%减小到 10%的情况
下系统主导极点分布

Fig. 2 Dominant poles when SOC is decreasing from 90% to 10%

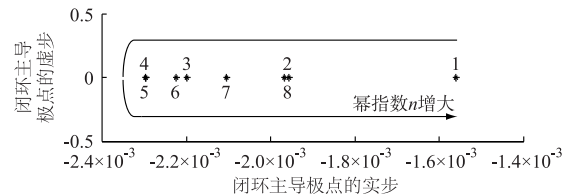


图 3 幂指数 n 从 2 变到 9 的情况下系统主导极点分布

Fig. 3 Dominant poles when exponent n is increasing from 2 to 9

此外,可采用传统下垂控制方法对系统中的无功功率进行均等分配。由于有功功率和无功功率的分配满足式(1)和式(2)的关系,且相互解耦,因此,此处未对传统无功功率下垂控制方法进行分析。

1.2 有功功率分配速率调整

联立式(3)、式(4)和式(26),可得:

$$\frac{p_{\text{AC,LPF1}}}{p_{\text{AC,LPF2}}} = \frac{Q_{\text{SOC1}}^n}{Q_{\text{SOC2}}^n} \quad (30)$$

由于 SOC 变化缓慢,近似可得:

$$\frac{p_{\text{AC1}}}{p_{\text{AC2}}} \approx \frac{p_{\text{AC,LPF1}}}{p_{\text{AC,LPF2}}} = \frac{Q_{\text{SOC1}}^n}{Q_{\text{SOC2}}^n} \quad (31)$$

联立式(12)、式(13)、式(25)和式(30),可得:

$$Q_{\text{SOC1}} = Q_{\text{SOC1},t=0} - \frac{P_{\text{load}}}{C_e V_{\text{DC}}} \int \frac{Q_{\text{SOC1}}^n}{Q_{\text{SOC1}}^n + Q_{\text{SOC2}}^n} dt \quad (32)$$

$$Q_{\text{SOC2}} = Q_{\text{SOC2},t=0} - \frac{P_{\text{load}}}{C_e V_{\text{DC}}} \int \frac{Q_{\text{SOC2}}^n}{Q_{\text{SOC1}}^n + Q_{\text{SOC2}}^n} dt \quad (33)$$

解得式(32)和式(33)的数值解,利用式(31),可得 2 台逆变器输出功率的数值解,如图 4 所示。由图 4 可知,对于较大的幂指数 n ,功率均分速率加快。因此,在提出的改进下垂控制方法中,可通过改变 SOC 的幂指数 n ,实现对有功功率分配速率的调整。

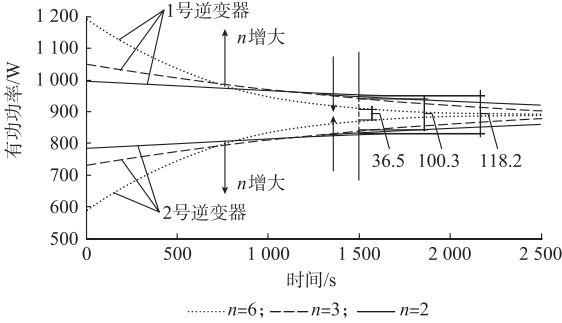


图 4 幂指数 n 对功率均分速率的影响
Fig. 4 Effects of exponent n on power sharing speed

1.3 改进下垂控制方法参数范围限制

如式(3)和式(4)所示,在改进的下垂控制方法中,下垂系数 m 的取值为:

$$m_p = \frac{m_0}{Q_{SOC}^n} \quad (34)$$

由文献[13]可知,下垂系数的取值不可过大,否则将影响系统稳定性。由式(34)可知,改进的下垂控制方法中,有功下垂系数和其初始下垂系数、储能单元 SOC 及其幂指数 n 有关。因此,为确保 m_p 不超过其最大值,需保证以下条件。

- 1)选取合适的初始下垂系数 m_0 ,其取值通常较小,以减小下垂控制造成的频率跌落。
- 2)幂指数 n 的取值不可过大,以保证在 SOC 取值较小时,下垂系数不会下降过快。
- 3)需将 SOC 控制在一定范围内,取值不能较小。这不仅受限于文中提出的算法,同样受限于储能单元本体特性。对于储能单元单体而言,当 SOC 过小时,其输出电压将会出现较大跌落,无法正常对负载供电,需转为充电状态。因此,实际中当储能单元处于放电状态时,其 SOC 的最低值为 0.1~0.3,若 SOC 低于此值,则转为充电状态。文中所提算法侧重在放电过程中对负载的电能供给,因此 SOC 不会过低。考虑到频率需保持在允许范围内,若 SOC 过低,则需将该储能单元切除,不使其继续供电。

2 仿真验证

为了验证上述理论分析结果,搭建了基于 MATLAB/Simulink 的仿真模型,仿真中选取 SOC 的幂指数 $n=6$ 。

图 5 给出在不存在储能单元切除的情况下,利用基于储能单元 SOC 的下垂控制对 SOC 及逆变器输出功率进行调整的结果。由图 5 可知,利用改进的下垂控制方法,3 个储能单元的 SOC 趋于相等,且 3 台逆变器的输出功率逐渐达到平衡,实现了结合 SOC 对负荷功率进行分配的目的。此时,对应的

系统频率曲线如附录 A 图 A1 所示。由图 A1 可知,在储能单元放电全过程中,系统中最大的频率跌落为 0.5 Hz,频率跌落不超过 1%。

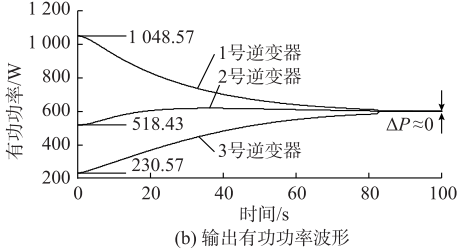
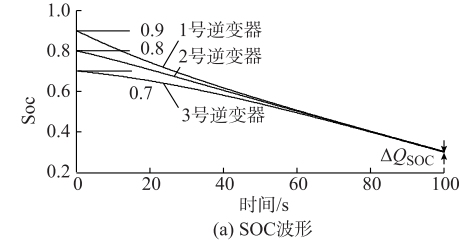


图 5 包含 3 个储能单元的并联逆变器系统在无储能单元切除情况下的输出波形
Fig. 5 Simulation results of parallel inverters with three energy storage units and no unit is cut off

图 6 所示结果验证了当部分储能单元切除时改进下垂控制方法的有效性。

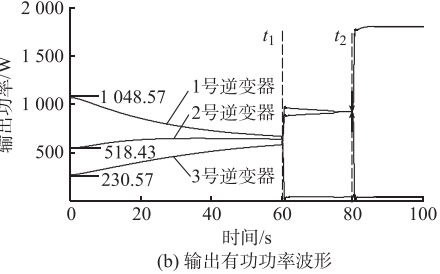
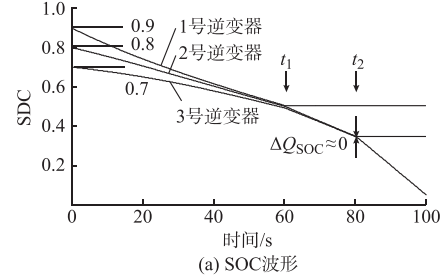


图 6 包含 3 个储能单元的并联逆变器系统在有储能单元切除情况下的输出波形
Fig. 6 Simulation results of parallel inverters with three energy storage units and some units are cut off

如图 6 所示,在 t_1 时刻前,3 组储能单元同时工作,三者的 SOC 趋于相等,且功率趋于均等分配。在 t_1 时刻,1 号逆变器切除,负载功率完全由 2 号逆变器和 3 号逆变器供给。在改进的下垂控制作用下,二者继续趋于均等分配负荷,同时,二者的 SOC

趋于相等。在 t_2 时刻,2 号逆变器切除,负载功率由 3 号逆变器单独供给。在存在故障切除的情况下,改进下垂控制方法仍然适用,仍可实现对于各储能单元 SOC 的均衡并结合 SOC 的负荷功率动态分配。 t_1 和 t_2 时刻切换过程中输出电流的暂态波形如附录 A 图 A2 和图 A3 所示。储能单元切除过程中,由于系统中剩余储能单元分配到的输出功率变大,因此,与其对应的逆变器的输出电流相应变大。由于电压波形变化相对电流波形较小,为清楚显示切换暂态过程,给出逆变器输出电压和电流的幅值变化曲线,如附录 A 图 A4 和图 A5 所示。切除部分储能单元后,剩余储能单元输出功率加大,输出电流幅值提升,同时下垂控制带来的电压跌落增大,电压幅值相应下降。

系统中的无功功率采用传统 Q-E 下垂控制方法进行均等分配,分配误差控制在 30 Var 以内。

3 实验验证

为对理论分析结果进行实验验证,搭建了基于 dSPACE 的 2×2.2 kW 并联逆变器样机平台,其结构如附录 A 图 A6 所示。由于负载条件所限,实验中将负载功率减至 700 W。实验得到的交流母线电压和电流波形如附录 A 图 A7 和图 A8 所示。由图 A7—A8 可知,交流侧具有良好的电压和电流输出性能。

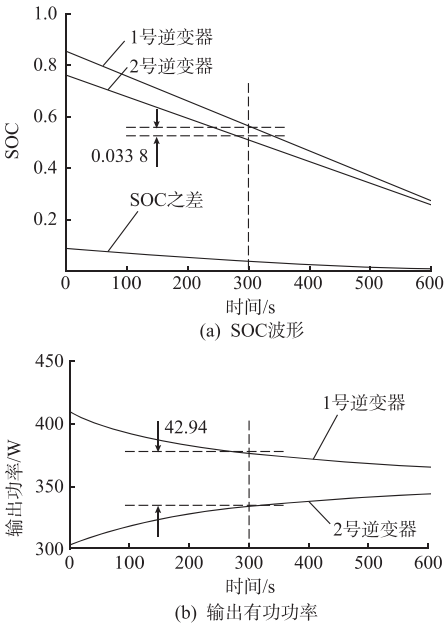


图 7 幂指数 $n=2$ 时 SOC 及 2 台逆变器输出有功功率波形

Fig. 7 SOC and output power of two inverters when exponent $n=2$

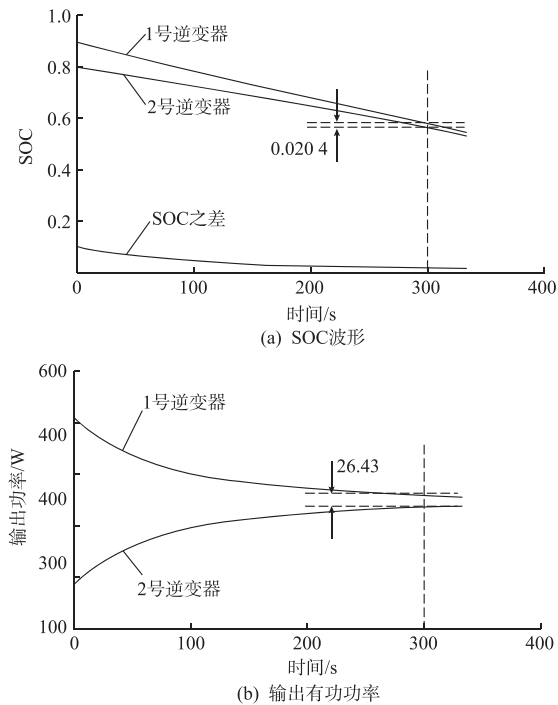


图 8 幂指数 $n=6$ 时 SOC 及 2 台逆变器输出有功功率波形

Fig. 8 SOC and output power of two inverters when exponent $n=6$

图 7 和图 8 分别为幂指数 n 为 2 和 6 的情况下,储能单元 SOC 及变换器输出有功功率的变化情况。实验中幂指数 n 的增大可加快 SOC 和输出有功功率均分的速率,满足理论分析结果。

同样,无功功率采用传统方法进行均分,分配误差控制在 30 Var 以内。

4 结论

本文提出了基于储能单元 SOC 的改进下垂控制方法,通过仿真和实验对其进行验证,结论如下。

- 1) 该方法考虑储能单元自身的 SOC,对传统下垂控制方法中的下垂系数实现了动态调节,满足微电网系统中储能单元的分布式接入要求。
- 2) 利用提出的改进下垂控制方法, SOC 较大的储能单元提供较多的有功功率, SOC 较小的储能单元提供较少的有功功率,以实现有功功率在不同储能单元间的合理分配。
- 3) 通过调整 SOC 幂指数 n 的取值,实现对功率分配速率和 SOC 均衡速率的有效调节,快速实现多个储能单元输出功率的均衡,且 SOC 迅速趋近。

附录见本刊网络版 (<http://aeprs.sgepri.sgcc.com.cn/aeprs/ch/index.aspx>)。

参考文献

[1] BOSSANYI E. Wind energy handbook[M]. New York, NY, USA: Wiley, 2000.

[2] MARKVART T. Solar electricity[M]. New York, NY, USA: Wiley, 2000.

[3] LASSETER R, AKHIL A, MARNAY C, et al. The CERTS microgrid concept—white paper on integration of distributed energy resources[R]. Washington, DC, USA: US Department of Energy, 2002.

[4] 鲁宗相,王彩霞,闵勇,等.微电网研究综述[J].电力系统自动化,2007,31(19):100-107.
LU Zongxiang, WANG Caixia, MIN Yong, et al. Overview on microgrid research[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 100-107.

[5] 杜威,姜齐荣,陈蛟瑞.微电网电源的虚拟惯性频率控制策略[J].电力系统自动化,2011,35(23):26-31.
DU Wei, JIANG Qirong, CHEN Jiaorui. Frequency control strategy of distributed generations based on virtual inertia in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23): 26-31.

[6] 郑竞宏,王燕廷,李兴旺,等.微电网平滑切换控制方法及策略[J].电力系统自动化,2011,35(18):17-24.
ZHENG Jinghong, WANG Yanting, LI Xingwang, et al. Control methods and strategies of microgrid smooth switchover[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(18): 17-24.

[7] 陈达威,朱桂萍.微电网负荷优化分配[J].电力系统自动化,2010,34(20):45-49.
CHEN Dawei, ZHU Guiping. An investigation on optimal load distribution of microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(20): 45-49.

[8] GUERRERO J M, VASQUEZ J C, MATAS J, et al. Control strategy for flexible microgrid based on parallel line-interactive UPS systems[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 726-736.

[9] GUERRERO J M, VASQUEZ J C, MATAS J, et al. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—a general approach toward standardization [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 158-172.

[10] LU X, SUN K, GUERRERO J M, et al. SOC-based droop method for distributed energy storage in DC microgrid applications[C]// Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics, May 28-31, 2012, Hangzhou, China.

[11] BLAABJERG F, CHEN Z, KJAER S B. Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2004, 19(5): 1184-1194.

[12] ZHOU H, BHATTACHARYA T, TRAN D, et al. Composite energy storage system involving battery and ultracapacitor with dynamic energy management in microgrid applications[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2011, 26(3): 923-930.

[13] BARKLUND E, POGAKU N, PRODANOVIC M, et al. Energy management in autonomous microgrid using stability-constrained droop control of inverters[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2008, 23(5): 2346-2352.

[14] LOH P C, LI D, BLAABJERG F. Autonomous control of interlinking converters in hybrid AC-DC microgrids with energy storages [C]// Proceedings of IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, September 17-22, 2011, Phoenix, AZ, USA.

陆晓楠(1985—),男,通信作者,博士研究生,主要研究方向:新能源系统中电力电子变换器控制。E-mail: lxn04@mails. tsinghua. edu. cn

孙凯(1977—),男,副教授,主要研究方向:电力电子变换器控制及电气传动。

黄立培(1946—),男,教授,主要研究方向:电力电子变换器控制及电气传动。

Improved Droop Control Method in Distributed Energy Storage Systems for Autonomous Operation of AC Microgrid

LU Xiaonan¹, SUN Kai¹, HUANG Lipei¹, XIAO Xi¹, J. M. GUERRERO²

(1. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Department of Energy Technology, Aalborg University, Aalborg 9220, Denmark)

Abstract: In order to improve the stability and reliability of the microgrid system, the distributed energy storage unit is employed as the energy buffer. To realize the rational sharing of the load power among different distributed energy storage units, an improved droop control method based on the state-of-charge (SOC) is proposed. With the decentralized SOC-based droop method, the droop coefficient is adjusted according to the SOC. The unit with higher SOC delivers more active power, while the one with lower SOC delivers less active power. Meanwhile, the conventional droop control for equal reactive power sharing is employed. A small signal model of the SOC-based droop control method is developed to validate the system stability. A simulation model based on MATLAB/Simulink and a 2×2.2 kW prototype are implemented to demonstrate the correctness and efficiency of the proposed method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177083) and National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2012AA050217).

Key words: AC microgrid; autonomous operation; distributed energy storage system; distributed control; droop control; state-of-charge (SOC)